

谷志峰. 絮凝-真空预压-逐级加压电渗法的试验研究[J]. 华南地震, 2021, 41 (1): 146-152. [GU Zhifeng. Experimental Study on the Improvement of Dredged Slurry by Flocculation-Vacuum Preloading-Step-by-Step Loading Voltage Electro Osmosis Method[J]. South China journal of seismology, 2021, 41(1): 146-152]

## 絮凝-真空预压-逐级加压电渗法的试验研究

谷志峰

(上海浦东工程建设管理有限公司, 上海 201210)

**摘要:** 为解决真空预压联合电渗法排水板淤堵以及电渗中后期排水效率低的问题, 提出了絮凝-真空预压-逐级加压电渗法。通过监测土体出流量、土体表面沉降和电流强度, 分析最终含水量、十字板剪切强度等指标, 研究了不同加载电压级数下絮凝-真空预压-逐级加压电渗法对疏浚淤泥的加固效果。结果表明: 新方法的土体出流量更多, 土体表面沉降更显著, 十字板剪切强度更高且更均匀; 逐级加载电压能有效减缓电渗过程中电阻剧增的趋势; 采用加载电压级数越多, 加固效果越好, 处理后的十字板剪切强度达到 64 kPa, 含水量降至 40.3%。

**关键词:** 疏浚淤泥; 絮凝; 真空预压; 电渗

**中图分类号:** TU443

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-8662(2021)01-00146-07

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2021.01.20

## Experimental Study on the Improvement of Dredged Slurry by Flocculation-Vacuum Preloading-Step-by-Step Loading Voltage Electro Osmosis Method

GU Zhifeng

(Shanghai Pudong Project Development Co., Ltd., Shanghai 201210, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of blockage of drainage plate and the lower drainage efficiency of mid-late stage of electro osmosis by vacuum preloading in combination with electro osmosis method, flocculation-vacuum preloading-step-by-step loading voltage electro osmosis method was proposed. The drainage of soil, the soil surface settlement and the current intensity were monitored. The final water content, vane shear strength and other indicators were analyzed to investigate the influence of different loading voltage levels on the improvement of dredged slurry by flocculation-vacuum preloading-step-by-step loading voltage electro osmosis method. The results showed that this new method had more soil outflow and more significant soil surface settlement. The vane shear strength of the reinforced soil is higher and more uniform. The method of step-by-step-loading-voltage effectively slowed down the tendency of sharp increase in resistance during electro osmosis process. In addition, the more loading voltage stages are used, the better reinforcement effect will be. The vane strength of soil after

**收稿日期:** 2021-01-10

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51878402)

**作者简介:** 谷志峰(1990-), 男, 硕士, 建筑工程师, 主要从事市政项目管理。

treatment reached 64 kPa and the water content of soil reduced to 40.3%.

**Keywords:** Dredged slurry; Flocculation; Vacuum preloading; Electro osmosis

0 引言

在处理软土地基方面，真空预压法和电渗法已成为成熟且有效的技术。但随着国内大量河道清淤工程的开展，软土地基经常使用疏浚淤泥当作填料，然而疏浚淤泥的工程性质极差<sup>[1]</sup>，使得单一的处理工法加固效率低下，已较难满足工程需求。

近年来，国内外学者陆续展开了一系列真空预压法、电渗法联合处理疏浚淤泥地基的试验研究，如 Wang 等<sup>[2]</sup>关于真空预压联合电渗法中最优电渗启动时间的探究、Fu 等<sup>[3]</sup>关于真空预压联合变间距电渗试验研究以及 Sun 等<sup>[4]</sup>关于真空预压联合电渗法中电动排水板使用的试验研究。这些研究表明：真空预压联合电渗法较单一处理工法具有更好的排水固结效果。但该方法在处理疏浚淤泥时仍存在局限性。一方面，由于疏浚淤泥主要由细颗粒组成，在真空预压过程中，一部分细颗粒较难在原地絮凝成稳定结构，会迁移至排水板附近聚合造成排水板淤堵；另一方面，土中水分和盐分含量会随真空-电渗排水作用不断减少，土体间较高的界面电阻导致电渗能耗较大且电渗后期排水效率较低。

为改善真空预压联合电渗法中排水板淤堵的问题，赵森等<sup>[5]</sup>发现通过向疏浚淤泥内添加一定量的絮凝剂可以降低其黏性，增强渗透性。武亚军等<sup>[6]</sup>采用絮凝-真空预压法进行了工程废浆处理试验，发现添加絮凝剂能更好的对废浆进行固液分离，土体的含水量和孔隙比在处理后就大幅降低，有效缓解排水板淤堵。Liu 等<sup>[7]</sup>通过絮凝-真空预压室内模型试验对比分析了两种单一絮凝剂 FeCl<sub>3</sub>、APAM 对疏浚淤泥减量化的处理效果；试验表明：APAM 可以在较小用量下取得和 FeCl<sub>3</sub> 相当的疏浚淤泥减量化处理效果，且对重金属物质的固化更为有效。而后，Wang 等<sup>[8]</sup>研究了复合絮凝剂 FeCl<sub>3</sub>-APAM 对河道底泥减量化的处理效果，发现复合絮凝剂在 1:5 的配合比下可以最大程度缓解排水板淤堵、固化河道底泥中的重金属物质。上述研究大多侧重于絮凝剂对单一处理工法的优化，而关于絮凝剂对真空预压联合电渗法的优化研究目前尚少。此外，针对电渗过程中能耗较大且中

后期排水效率低的问题，刘飞禹等<sup>[9]</sup>提出采用逐级加载电压代替恒定电压的通电方式，通过室内模型试验发现，采用逐级加载电压的通电方式能有效降低电渗能耗、提高中后期排水效率。KARUNARATNE G P<sup>[10]</sup>、房营光等<sup>[11]</sup>采用单一逐级加压方案的室内电渗试验研究，与传统电渗法相比，采用逐级加载电压能有效促进电渗固结排水，提高电渗加固效果。虽然关于逐级加压电渗法的研究已较为成熟，但关于逐级加载电压级数对逐级加压电渗法加固效果的影响国内外鲜有学者研究。

针对以上问题，本文提出絮凝-真空预压-逐级加压电渗法来优化传统真空预压联合电渗法。通过研究在不同加载电压级数下絮凝-真空预压-逐级加压电渗法处理疏浚淤泥时土体排水、电流强度和十字板剪切强度，得到了最优的加载电压级数，以期对工程应用有所裨益。

1 试验介绍

1.1 试验材料

试验所用土样来自温州某河道疏浚工程，具体参数见表 1，试样的颗粒级配曲线见图 1。试验选取以无机 Ca(OH)<sub>2</sub> 为主的复合絮凝剂作为添加药剂。

表 1 疏浚淤泥的基本物理性质  
Table 1 Basic physical properties of dredged silt

含水量 <i>w</i> /%	干密度 <i>ρ<sub>d</sub></i>	孔隙比 <i>e</i>	塑限 <i>W<sub>p</sub></i> /%	液限 <i>W<sub>L</sub></i> /%	不排水 抗剪强 度 <i>C<sub>u</sub></i> /kPa	pH
83.5	0.4	2.37	52.5	23	≈0	8.3

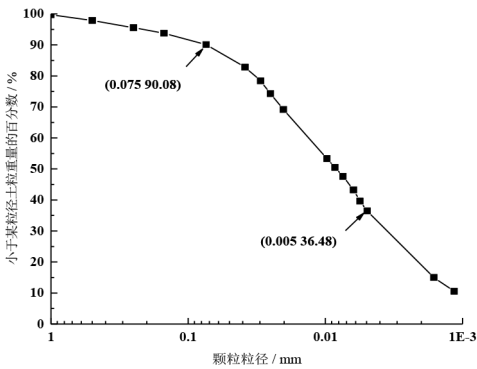


图 1 疏浚淤泥的初始颗粒级配曲线  
Fig.1 The initial particle grading curve of dredged silt

1.2 试验装置

试验装置实物图见图 2，试验装置示意图见图 3。由图可知，该装置主要由真空预压系统和电渗系统组成：真空预压系统包括模型桶、真空泵、真空软管、气-水分离瓶、密封膜以及排水板。模型桶采用厚度 10 mm 的有机玻璃制成，内径 160 mm，高度 390 mm；真空泵输出功率 3.88 kW，真空压力上限值 0.098 MPa；气-水分离瓶用于收集试验中排出的水；密封膜为 0.14 mm 厚的聚氯乙烯膜；排水板采用新型整体式防淤堵排水板。电渗系统由直流电源、阳极、阴极和电源导线组成。选用 GW SPD-3606 稳压直流电源，可为电渗过程提供稳压输出，最大电压 60 V，最大电流 12 A；阴极由直径 8 mm、长 360 mm 的钢筋制成；阳极由直径 8 mm 的钢筋和环形钢筋制成，环形钢筋的内环半径 150 mm，四周均匀焊接长度 360 mm 的 6 根钢筋。电极布置形式采用梅花形布置，较传统电极布置形式而言，使用的电极数目更少，消耗的电能更少，并且处理后土体的均匀性更好<sup>[12]</sup>。当真真空预压末期土体排水困难时(单位时间土体排水量小于 0.02 kg)，启动电渗。



图 2 试验装置实物图

Fig.2 The physical diagram of test apparatus

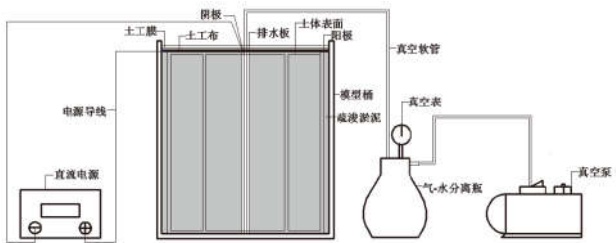


图 3 试验装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of test apparatus

1.3 试验方案

为研究加载电压级数对絮凝-真空预压-逐级加压电渗法加固效果的影响以及絮凝-真空预压-逐级加压电渗法对传统真空预压联合电渗法的改

进效果，依据电渗法室内试验和现场试验电势梯度的取值 (0.5 ~1.5 V/cm)<sup>[9]</sup>，选取 4 组电压值：9 V、12 V、15 V、18 V 和 21 V(对应的电势梯度分别为 0.6、0.8、1、1.2 和 1.4 V/cm)，设置了 6 组加载方案(T1-T6)，见表 2。

表 2 试验方案  
Table 2 Test schemes

试验组别	加载模式	加载电压级数
T1	VP-EO(21 V/6 d)	—
T2	F-VP-EO(21 V/6 d)	—
T3	F-VP-SEO (18 V/3 d-21 V/3 d)	1
T4	F-VP-SEO (15 V/2 d-18 V/2 d-21 V/2 d)	2
T5	F-VP-SEO (12 V/1.5 d-15 V/1.5 d-18 V/1.5 d-21 V/1.5 d)	3
T6	F-VP-SEO (9 V/1.2 d-12 V/1.2 d-15 V/1.2 d-18 V/1.2 d-21 V/1.2 d)	4

表 2 中：T1 表示第一组试验；F 表示絮凝试验；VP 表示真空预压试验；EO 表示电渗试验；SEO 表示逐级加压电渗试验；F-VP-EO 表示絮凝-真空预压-电渗试验；F-VP-SEO(9 V/1.2 d-12 V/1.2 d-15 V/1.2 d-18 V/1.2 d-21 V/1.2 d)表示絮凝-真空预压-逐级加压电渗试验，并在电渗过程中按先后顺序分别以 9 V、12 V、15 V、18 V 和 21 V 的电压通电 1.2 d；表 2 中其它符号含义均以此类推。除加载电压级数不同外，其它试验条件均保持一致，如总电渗时长 (6 d)、各组土样总质量(54.78 kg)等。

1.4 试验程序

根据模型桶尺寸以及试验土样干密度确定各组试验所需土样干质量为 29.65 kg。依据掺入比 (S)公式(1)以及文献<sup>[9]</sup>中所确定的以无机 Ca(OH)<sub>2</sub> 为主的复合絮凝剂最优掺入比 1.5%，计算出各组试验所需复合絮凝剂的掺量为 444.75 g。将土样与复合絮凝剂统一搅拌 5 min，均匀混合后静置 24 h，土样深度为 360 mm。静置后，将排水板插入有机玻璃模型桶中心位置，使阴极和阳极在模型桶中同轴布置，并将汇集在阴极附近的水分通过

排水板排出,达到加固土体的效果。

$$S = \frac{\text{絮凝质量}}{\text{干土质量}} \quad (1)$$

连接排水板和真空软管,将聚氯乙烯膜铺设在土样上,气-水分离瓶和真空泵通过真空软管连接,用玻璃胶密封潜在的漏气位置,将阴极、阳极与电源连接。

为评估各组试验对疏浚淤泥的改良效果,在试验前后,对土体含水量、十字板剪切强度、渗透系数以及塑性指数进行检测。在试验期间,每2 h监测一次土体排水量、土体表面沉降量和电流强度,检测点和监测点的布置见图4。

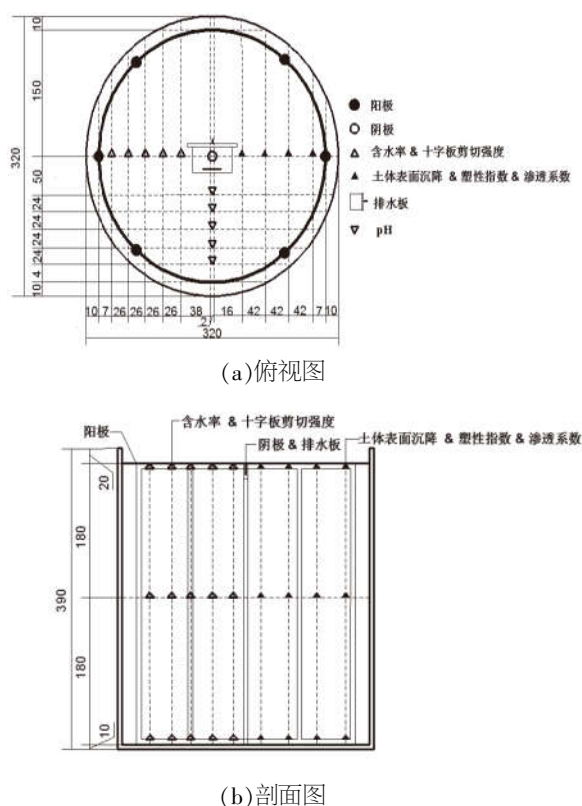


图4 测点布置图(单位:mm)

Fig.4 Layout of measuring points(Unit:mm)

## 2 试验结果与数据分析

### 2.1 排水量

累计排水量随时间的变化关系曲线见图5。在真空预压阶段,T1的累计排水量低于其他试验组。这与T2~T6试验组内的絮凝剂有关。一方面,絮凝剂可通过有效的化学絮凝作用中和微小土颗粒表面的电荷,促使大部分微小土颗粒相互聚集变大,增大土颗粒间的孔隙,降低土体黏性,土中孔隙水更容易通过真空预压作用排出;另一方面,

絮凝剂对真空预压有“主动防淤堵”作用<sup>[6]</sup>,絮凝剂可以降低真空预压过程中水流动的摩擦阻力,缓解真空渗流过程中的淤堵,促进真空固结排水。

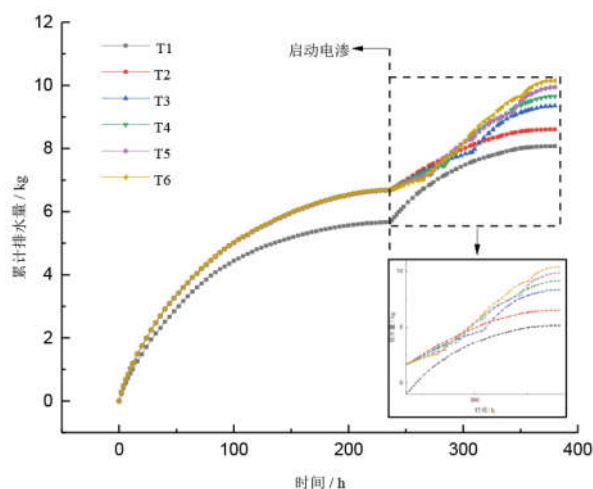


图5 累计排水量随时间的变化关系曲线

Fig.5 The curve of cumulative drainage varying with time

当真空时长达236 h时,各组试验土体排水量均趋于稳定,启动电渗。由于T2试验前添加了絮凝剂,使得T2相对于T1在真空预压阶段土体排水量较多,启动电渗时土中含水量较低,土体电阻较高,电渗阶段排水效率较低,排水量为1.925 kg,比T1在该阶段的排水量少19.9%。虽然T3~T6试验前也添加了絮凝剂,但由于T3~T6采用逐级加载电压的通电方式,每次加载电压时,电流强度均得到提高,电流衰减得到抑制,有效提高了电渗排水效率。T3~T6在电渗阶段的排水量比T1分别高出11.3%、23%、35.8%和44%。比较T3~T6在电渗阶段的排水量发现,T6的排水量最高,达到3.462 kg。说明在电渗阶段采用的加载电压级数越多,越有利于促进电渗固结排水。此外,相比于启动电渗时的含水量对电渗阶段排水量的影响,加载电压级数的影响更为显著,排水量会随着电压升高出现较为显著的跃升。但相比于初始施加较高电压的T2而言,T3~T6在电渗中后期的排水效率显著高于T2。这是由于较高的初始加载电压虽然能够短暂地提高电渗初期排水效率,但会导致土中电阻剧增,使电流强度衰减较快,电渗中后期排水效率较低。

电渗末期土体排水困难时,试验停止。T1~T6的总排水量分别为8.074 kg、8.61 kg、9.35 kg、9.652 kg、9.945 kg和10.15 kg。通过比较T1~T6的总排水量发现,T3~T6的总排水量高于T1和

T2, 且 T6 的总排水量最高。说明絮凝-真空预压-逐级加压电渗法相比于传统真空预压联合电渗方法获得了最优的土体排水效果; 同时, 加载电压级数越多, 越有利于促进土体排水固结。

## 2.2 土体表面沉降

如图 6 所示, T1~T6 在真空预压阶段的土体表面沉降量变化趋势均先增大后趋于平缓。由于 T2~T6 试验前添加了絮凝剂, 因此在真空预压阶段 T2~T6 的土体排水量较 T1 更多, 土体表面沉降发展更为显著。

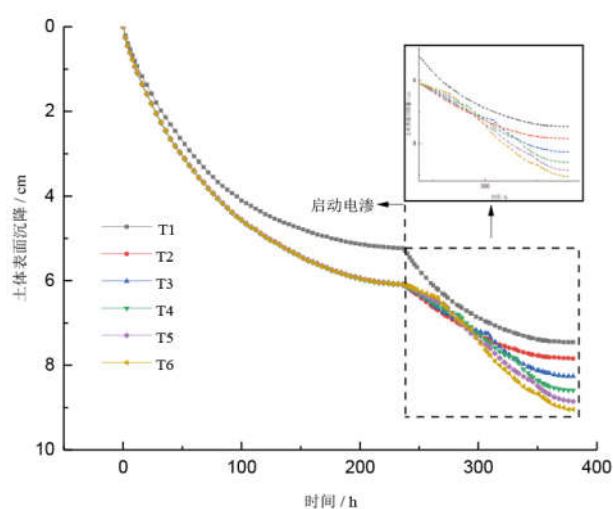


图 6 土体表面沉降随时间变化曲线

Fig.6 Curve of soil surface settlement varying with time

当真空时长达 236 h 时, 启动电渗。T1 在电渗阶段的排水量较 T2 多, 但由于电渗在真空预压末期开启, 因此电渗阶段土体排水量较低, 试验所排水主要集中于真空预压阶段, 最终在总体排水量上 T2 多于 T1, 因此 T2 较 T1 的最终土体表面沉降量高 5.2%。由于 T3~T6 采用逐级加载电压的通电方式, 因此在电渗中后期阶段的排水效率与 T2 相比较, 最终土体表面沉降量较 T2 分别高 5.4%、9.6%、12.9% 和 15.3%。说明絮凝-真空预压-逐级加压电渗法相比于其它方法而言, 土体表面沉降发展更为显著, 有利于减少处理后的沉降变形; 且逐级加载电压级数越多, 土体表面沉降发展越显著。

如图 7 所示, 各组试验中间测点处的最终土体表面沉降量大于两边测点, 且在距离阳极较近处的测点最终土体表面沉降量最小。这是因为在电渗过程中, 阳离子带动水流从阳极流向阴极, 土颗粒在水中负离子的带动下从阴极往阳极发生

电泳。较阴极区而言, 阳极区由于土颗粒聚集和附近沉淀物致密的缘故, 土体表面沉降较小; 而阴极区较中间土体而言, 由于土中水分汇集导致土体表面沉降也较小。

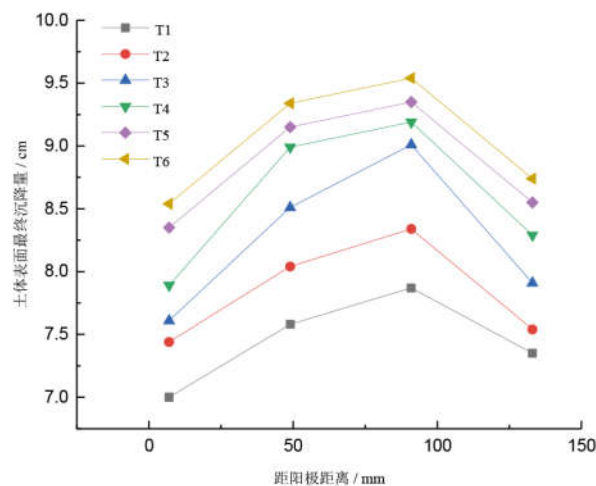


图 7 各测点处最终土体表面沉降量

Fig.7 The final soil surface settlement at each measuring point

## 2.3 电流强度

电渗阶段电流强度随时间的变化关系曲线见图 8。各试验组的电流强度整体呈现先增大后减小的趋势。在电渗早期可观察到电流强度逐渐增大, 究其原因: 一方面, 由于土颗粒还未发生迁移, 土中较易形成畅通的排水通道; 另一方面, 高含水率使电极与土体间界面电阻较低, 因此电流强度呈现增大的态势。由于 T2 在真空预压阶段排水较多, 开启电渗时含水量较 T1 低, 土体电阻较高, 因此初始电流强度较低。而 T3~T6 的初始加载电压与 T1 和 T2 相比较低, 因此初始电流强度也较低。

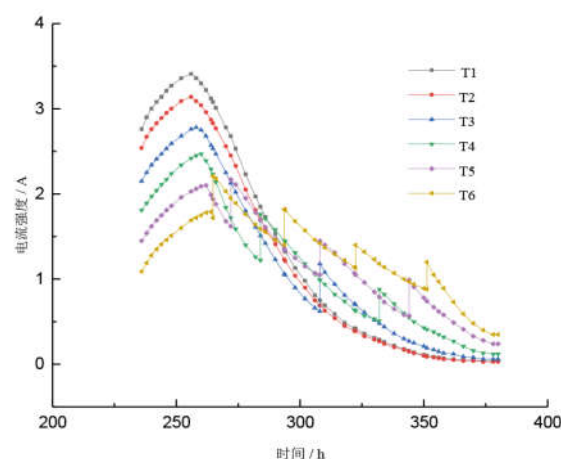


图 8 电流随时间变化关系曲线

Fig.8 Curve of current varying with time



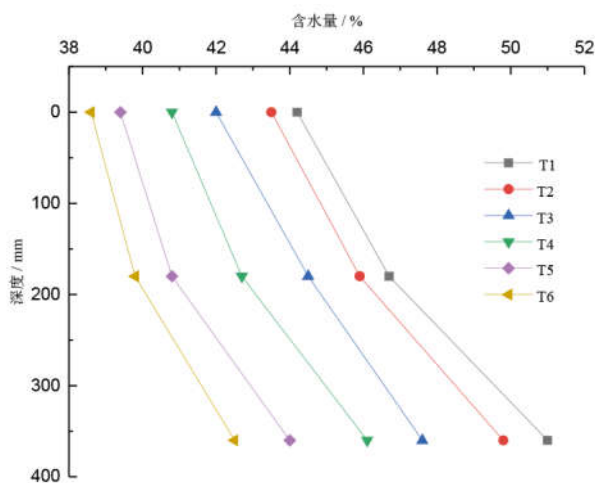
比较各组试验电流强度衰减的幅度发现, T3~T6 电流强度衰减的幅度小于 T1 和 T2; 且在 T3~T6 中, T6 电流强度衰减的幅度最小, 仅为 1.44A, 分别低于 T3~T5 电流强度衰减幅度的 47.1%、38.7%和 22.6%。这与 T3~T6 在电渗阶段采用逐级加载电压的通电方式有关。每次增加电压后, 电流强度得到提高, 电流强度降低的趋势得到减缓; 且加载电压级数越多, 越有利于抑制电路电流的衰减。

## 2.4 含水量和十字板剪切强度

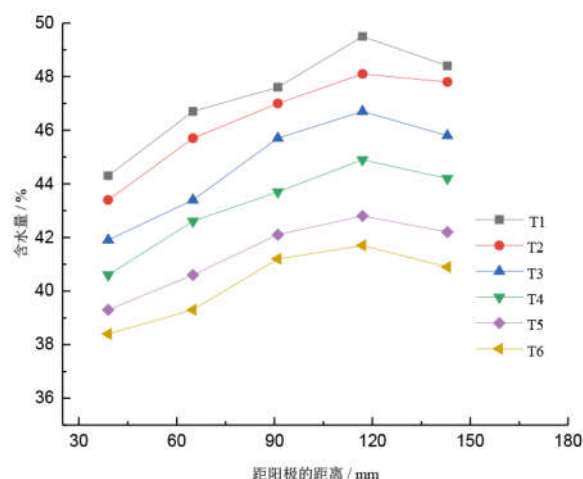
含水量和十字板剪切强度是评估疏浚淤泥改良效果的两个重要因素。试验后使用十字板剪切仪在距阳极水平距离 39 mm、65 mm、91 mm、117 mm 和 143 mm, 深度 0 mm、180 mm 和 360 mm

处进行十字板剪切试验; 同时, 在上述各位置处取土测量试验后土体含水量, 试验结果如图 9、图 10 所示。

如图 9(a)、10(a)所示, 浅层土体含水量低于深层土体, 浅层土体的十字板剪切强度高于深层土体。这与浅层土体的真空压力高于深层土体同时排水板主要集中于水平排水有关<sup>[13]</sup>。通过比较所有试验组最表层和最深层土体的含水量和十字板剪切强度的差值发现, T2 比 T1 分别低 7.4%和 21.4%; T3~T6 最表层和最深层土体含水量差值分别比 T2 低 11.1%、15.9%、26.9%和 38.1%, 剪切强度差值分别比 T2 低 18.2%、36.4%、54.5%和 63.6%。说明絮凝-真空预压-逐级加压电渗法能有效提高处理后土体的均匀性, 且加载电压级数越高, 土体均匀性越好。



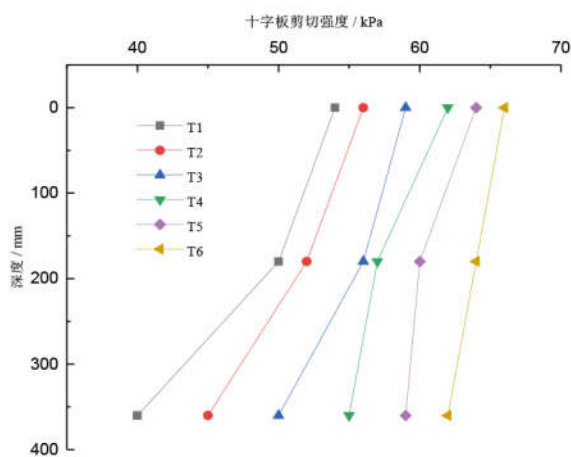
(a)



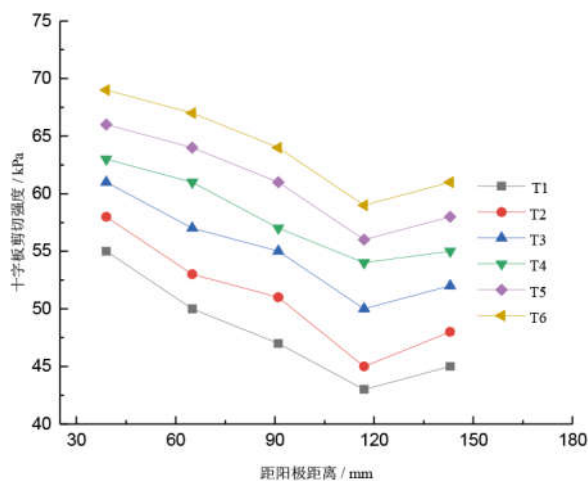
(b)

图 9 试验后土体含水量分布:(a)沿深度方向;(b)距阳极不同位置处

Fig.9 Distributions of the soil water content after test:(a) along the depth;(b) with different distance to the anode



(a)



(b)

图 10 试验后土体十字板剪切强度分布:(a)沿深度方向;(b)距阳极不同位置处

Fig.10 Distributions of the vane shear strength after test:(a) along the depth;(b) with different distance to the anode

如图 9(b)和 10(b)所示,就含水量和十字板剪切强度与到阳极距离之间的变化规律而言,离阳极越近,含水量越低,十字板剪切强度越高。造成这一现象的主要原因如下:一方面,根据电渗排水机理,孔隙水从阳极被驱动并积聚在阴极附近,因此阳极区土中含水量较阴极区更低,土体固结程度更高,十字板剪切强度更大;另一方面,从电化学角度上来看,由于阴极区发生还原反应( $2\text{H}_2\text{O}+2\text{e}^-\rightarrow 2\text{OH}^-+\text{H}_2$ )会生成大量  $\text{H}^2$ ,排出的气泡会使浅层土体不断产生纵向裂缝,原本深层土体的排水通道被纵向裂缝打断,从而造成阴极附近孔隙水无法排出。但由于排水板处真空压力较高,且真空压力随着距排水板水平距离的增加线性减小<sup>[14]</sup>,因此试验后土中含水量的最高点以及十字板剪切强度的最低点不在排水板附近。

### 3 结论

(1)絮凝-真空预压-逐级加压电渗法较传统真空预压联合电渗法而言,土体出流量更多,土体表面沉降发展更显著。此外,在电渗阶段采用逐级加载电压的通电方式能有效减缓电渗过程中电阻剧增的趋势,增强电路电流,抑制电路电流的衰减。

(2)与传统真空预压联合电渗法相比,絮凝-真空预压-逐级加压电渗法有效改善了真空预压中排水板淤堵的问题,处理后的土体含水量更低,十字板剪切强度更高,均匀性更好;

(3)在絮凝-真空预压-逐级加压电渗法处理疏浚淤泥过程中,采用的加载电压级数越多,电流强度衰减的幅度越小,土体出流量越多,加固效果越好;且在本试验中采用分 4 级加载电压的通电方式处理疏浚淤泥,处理后的土体十字板剪切强度达到 64 kPa,含水量降至 40.3%,加固效果最好。

### 参考文献

- [1] WANG Jun, CAI Yuanqiang, FU Hongtao. Experimental study on a dredged fill ground improved by a two-stage vacuum preloading method[J]. Soils and Foundations, 2018, 58(3):766-775.
- [2] WANG Jun, FU Hongtao, LIU Feiyu, et al. Influence of the electro-osmosis activation time on vacuum electro-osmosis consolidation of dredged slurry[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 55(1):147-153.
- [3] FU Hongtao, CAI Yuanqiang, WANG Jun. Experimental study on the combined application of vacuum preloading-variable-spacing electro-osmosis to soft ground improvement[J]. Geosynthetics International, 2016, 24(1):1-10.
- [4] SUN Zhaohua, GAO Mingjun, YU Xiangjuan. Vacuum Preloading Combined with Electro-Osmotic Dewatering of Dredged Fill Using Electric Vertical Drains[J]. Drying Technology, 2015, 33(7):847-853.
- [5] 赵森, 曾芳金, 王军, 等. 絮凝-真空预压加固吹填淤泥试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(6):1291-1296.
- [6] 武亚军, 陆逸天, 牛坤, 等. 药剂真空预压法处理工程废浆试验[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8):1365-1373.
- [7] LIU Feiyu, WU Wenqing, FU Hongtao. Application of flocculation combined with vacuum preloading to reduce river-dredged sludge[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2020, 38(2):164-173.
- [8] WANG Jun, SHI Wenjie, WU Wenqing. Influence of composite flocculant  $\text{FeCl}_3$ -APAM on vacuum drainage of river-dredged sludge[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56(6):868-875.
- [9] 刘飞禹, 宓伟, 王军, 等. 逐级加载电压对电渗加固吹填土的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12):2582-2591.
- [10] KARUNARATNE G P. Prefabricated and electrical vertical drains for consolidation of soft clay[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29(4):391-401.
- [11] 房营光, 徐敏, 朱忠伟. 碱渣土的真空-电渗联合排水固结特性试验研究[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2006, 34:70-75.
- [12] GLENDINNING Stephanie, LAMONT Black-john, JONES Colin J F P. Treatment of sewage sludge using electrokinetic geosynthetics[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 139(3):491-499.
- [13] WANG Baotian, VU M.Q. Improvement of silty clay by vacuum preloading incorporated with electroosmotic method[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, 2(4):365-372.
- [14] INDRARATNA B, SATHANANTHAN I, RUJIKIAT-KAMJORN C. Analytical and numerical modeling of soft soil stabilized by prefabricated vertical drains incorporating vacuum preloading[J]. International Journal of Geomechanics, 2005, 5(2):114-124.